

УДК 551.24

ОСОБЕННОСТИ ТЕКТОНИКИ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА ПО ДАННЫМ КОРРЕЛЯЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ГЕОДИНАМИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

© 2016 С.Ю. Соколов

Геологический институт РАН, Москва, 119017; e-mail: sysokolov@yandex.ru

Проведено сопоставление различных геолого-геофизических данных вдоль оси Срединно-Атлантического хребта (САХ) от 55° ю.ш. до 80° с.ш. с геодинимическим состоянием верхней мантии, определенным по отношению скоростей V_p/V_s сейсмотомографических моделей. Наблюдается геодинимическое влияние «холодных» блоков верхней мантии на средней глубине около 500 км с длинными разломными зонами. Кроме того, гравитационные аномалии, сейсмичность, типы магматизма, полускорости спрединга, содержание FeO в базальтах и кластерные сочетания геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ образуют систему фактов, имеющих непротиворечивую геодинимическую интерпретацию влияния «холодных» и «горячих» блоков мантии на характеристики литосферы, измеренные на поверхности. Фактор реологического состояния мантии дополняется по данным GPS наличием субмеридиональной компоненты движения, которая формирует сочетания параметров, свойственное преддуговым зонам, нетипичное распределение механизмов очагов землетрясений и активацию деформаций и напряжений вдоль субширотных зон с режимом транспрессии. Наблюдаемая асимметрия полускоростей спрединга сводится практически к нулю на сегментах САХ над «холодными» блоками мантии. Неоднородный профиль скорости вдоль магнитных изохрон на обоих бортах САХ создает условия для сдвиговых деформаций внутриплитного пространства, включая пассивные части трансформных разломов и дискордантные разломные трюги.

Ключевые слова: холодные мантийные блоки, асимметрия полускоростей спрединга, транспрессия, хребет.

ВВЕДЕНИЕ

Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) с каким-либо опорным параметром, отражающим реологическое состояние верхней мантии, как подход для геодинимического междисциплинарного изучения структуры является весьма эффективным. Одним из первых этот подход применил Э. Бонатти (1996). В этой работе при сравнении структурных особенностей осевой части Атлантики с данными сейсмотомографии выявлено, что крупные разломные зоны с длиной активной части > 200 км сопряжены в пространстве с «холодными» блоками верхней мантии. Были выдвинуты две версии этого факта: охлаждение мантии через макротрещиноватую среду и исходное присутствие долгоживущих «холодных» блоков по границам которых возни-

кают крупные разломные зоны. В результате анализа приведенных данных сделан вывод в пользу второй версии. В качестве опорного сейсмотомографического разреза использовалось осевое сечение модели RG5.5 (Zhang, Tanimoto, 1992) с параметризацией на ячейках 5°×5° для глубин от 3 до 500 км. Это позволило определить холодные зоны в экваториальном сегменте и на широтах примерно ±50°.

С появлением глобальных моделей (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997), охватывающих всю мантию, выявлены дополнительные «холодные» блоки на средних глубинах около 500 км, которые ранее были пропущены. Они имеют взаимосвязь с поверхностными структурами.

В представленной работе для корреляции вдоль САХ использован расчет V_p/V_s (Соколов, 2014) по более детальным сейсмотомографическим данным и дополнительные геофизические

параметры, графики которых сопоставляются с разрезом этого отношения.

КОРРЕЛЯЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Характеристики структурных элементов САХ — рифтовых сегментов и трансформных зон — отражают глубинное состояние верхней мантии. Представлена корреляция (рис. 1) этих характеристик и разрез вариации отношения скоростей V_p/V_s по данным (Соколов, 2014; Соколов и др., 2016), рассчитанный по сейсмотомографическим моделям (Becker, Boschi,

2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997). Пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии в экваториальной и северной Атлантике, совпадающие с интервалами максимального субширотного смещения зоны САХ.

Сопоставление позволяет увидеть следующие закономерности (Соколов и др., 2016). Протяженные (более 300 км) сегменты САХ (рис. 1, гр. 1) совпадают с «горячими» сейсмотомографическими аномалиями (рис. 1, гр. 5), что видно по положению центров сегментов САХ с большой длиной. Особенно много таких сегментов расположено в области подхода

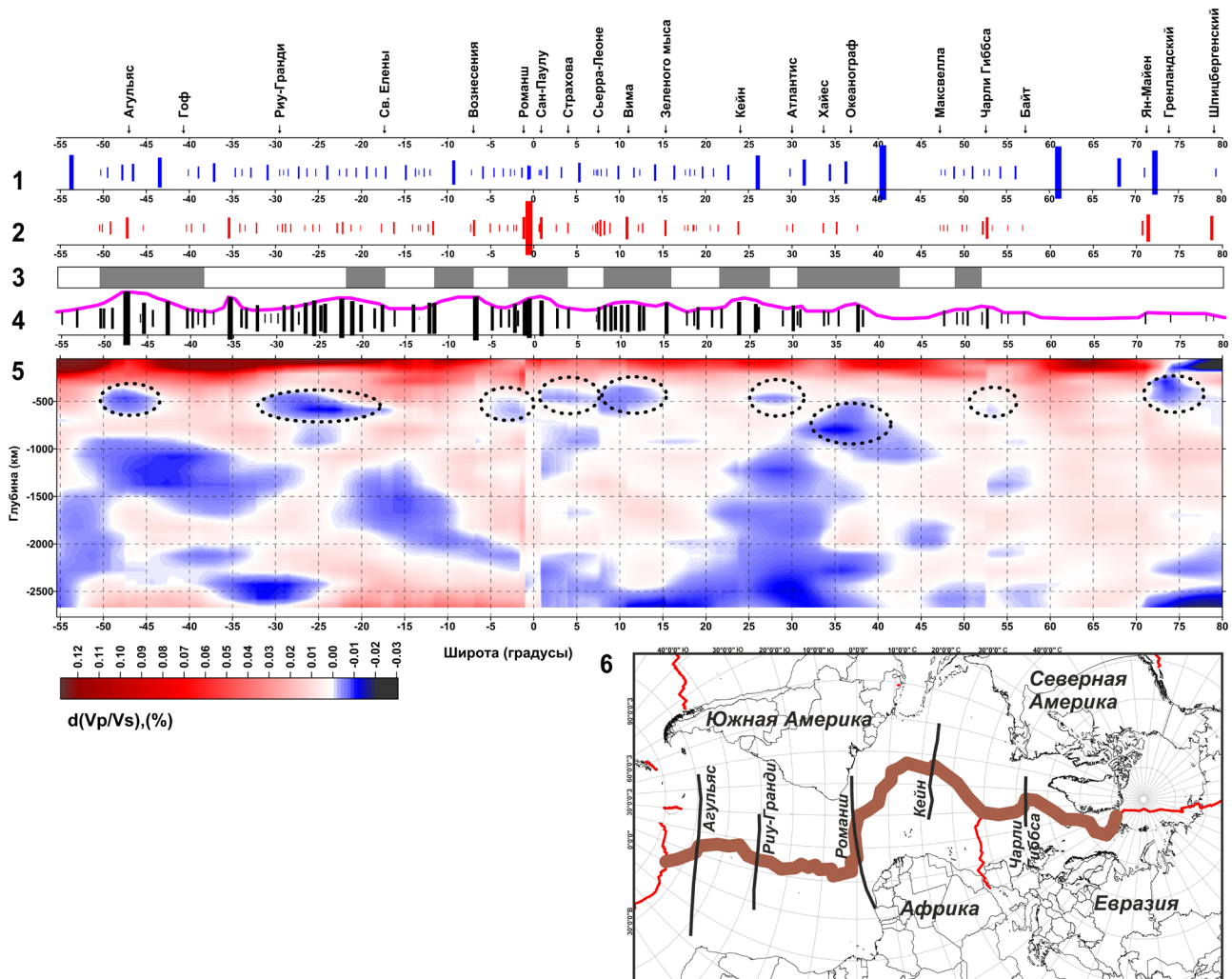


Рис. 1. Корреляция характеристик структурных элементов САХ (гр. 1–4) и разрез вариации отношения V_p/V_s (5) по данным (Соколов, 2014; Соколов и др., 2016). Графики сопоставляемых характеристик: 1 — центры сегментов САХ с размером символа, линейно пропорциональным длине сегментов (от 18 до 1186 км) и названия основных разломных зон, пересекающих САХ; 2 — положения офсетных зон трансформных разломов с размером символа, линейно пропорциональным длине офсетов (от 10 до 750 км); 3 — положение зон с аномальным сочетанием редукций гравитационного поля (Sokolov et al., 2008); 4 — положения пересечений трансформных разломов с САХ с размером символа, линейно пропорциональным общей длине включая пассивные части, и их огибающая (Соколов, 2007); 5 — вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмотомографическим данным для Р и S волн (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997), пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии в экваториальной и северной Атлантике; 6 — положение разреза вариации V_p/V_s вдоль САХ от 55° ю.ш. до 80° с.ш. и основные трансформные разломы.

Исландского и Азорского плюмов к САХ и в области южного ответвления Африканского суперплюма. Положения зон смещений трансформных разломов (рис. 1, гр. 2) соответственно разграничивают положения сегментов САХ и их максимальная концентрация наблюдается в интервалах, где сосредоточено много коротких сегментов. В экваториальной и северной Атлантике компактные группы разломов расположены над «холодными» аномалиями верхней мантии в местах максимального субширотного смещения САХ (Соколов, 2014). Наиболее ярким примером такого смещения является разлом Романш, состоящий из двух трогов, сходящихся на западе, и полиразломная система Сан-Паулу. К северу между 7° и 9° с.ш. это смещение над «холодным» блоком верхней мантии представлено полиразломной системой Архангельского-Долдрамс-Вернадского и к северу до 11° с.ш. группой сдвоенной системы разломов Марафон-Меркурий и разлома Вима. В северной Атлантике над «холодной» аномалией смещение САХ происходит по сдвоенной разломной системе Чарли-Гиббс. За аномалией Исландского плюма также есть сочетание «холодной» мантии и разломов с большим смещением — Ян-Майен и Шпицбергенского. Таким образом, большое смещение над «холодной» мантией может быть выражено обычными трансформными смещениями, но чаще оно распадается на сдвоенные и полиразломные системы.

Расположение зон с аномальным сочетанием редуций гравитационного поля — максимальным значением аномалии Буге и минимальным значением изостатической аномалии, полученных при помощи площадного кластерного анализа (рис. 1, гр. 3) показано в проекции на САХ (Соколов, 2007; Sokolov et al., 2008). Подобное сочетание указанных параметров существует в преддуговых зонах, где обширные надвиговые явления в области дуг приводят к формированию перед их фронтом зон с увеличенным недостатком масс при увеличенной аномалии Буге. Возможно, это происходит из-за наличия существенной субмеридиональной компоненты современных движений, приводящей к возникновению субширотных зон с активацией напряжений сжатия (Соколов, 2009а, 2009б, 2011), и соответствующих деформаций. На такую возможность указывают современные данные наблюдений GPS на прилегающих континентах (GPS, 2008). Преддуговые характеристики по данным кластерного анализа, подтверждаются наличием надвиговых структур с субмеридиональной вергентностью на сейсмических профилях в глубоководной части океана к востоку от САХ (Соколов, 2007).

Поскольку речь идет о зонах, коррелируемых с длиной разломных систем, то субмеридиональ-

ное сжатие может привести к существованию транспрессионных условий вдоль разломов, включая их пассивные части. Общие длины последних показаны на рис. 1 на гр. 4 по данным (Соколов, 2007) вместе с огибающей кривой. Концентрация макротрещиноватости в виде трансформных нарушений в пересечении с САХ коррелируется с зонами, соответствующими указанному ранее сочетанию гравитационных редуций. Совпадение плотности разломных зон вдоль САХ с косвенными признаками субмеридионального сжатия говорит о наличии дополнительного фактора, определяющего характеристики главных структурных элементов САХ. Наиболее длинные зоны смещения САХ по полиразломной системе Сан-Паулу вместе с разломом Романш находятся в пределах экваториальной «пульсации» параметров, показанных на рис. 1 на гр. 3–4. Псевдопериодическое распределение в пространстве максимумов коррелируемых параметров имеет средний шаг около 12° (1320 км). Этот шаг сопоставим с глубиной расположения холодных линз в верхней мантии от 500 до 1500 км в особенности в южном сегменте САХ и под Азорскими островами (рис. 1, гр. 5).

КЛАСТЕРЫ, ГРАВИТАЦИОННЫЕ АНОМАЛИИ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ВДОЛЬ САХ

Сопоставление результатов кластерного анализа геофизических параметров (Sokolov et al., 2008) непосредственно вдоль оси САХ и других характеристик с сейсмотомографическим разрезом показывает, что аномалии Буге (рис. 2, гр. 2) приобретают глубокие минимумы в районах с высокопродуктивным магматизмом, которые расположены над плюмовыми аномалиями сейсмотомографического разреза (рис. 2, гр. 6). Это вполне логично. Продуктивный магматизм формирует базальтовый слой повышенной мощности с большей глубиной границы Мохоровичича (М), что и определяет минимумы Буге, а уровень рельефа в магматических сегментах САХ увеличивается, что определяет значения аномалий в свободном воздухе (рис. 2, гр. 1). Таким образом эти две аномалии формируют пару с обратной корреляцией, которая прослеживается на масштабах неоднородностей сопоставимых с глубинами томографических аномалий в верхней мантии. Наименьшим линейным размером такой неоднородности, в которой бесспорно определяется обратная корреляция, является сегмент около о. Вознесения от 8° до 10.5° ю.ш., равный ~260 км. На меньшей детальности антикорреляция становится неочевидной, что возможно означает преобладание других факторов в формировании уровня рельефа на средне- и

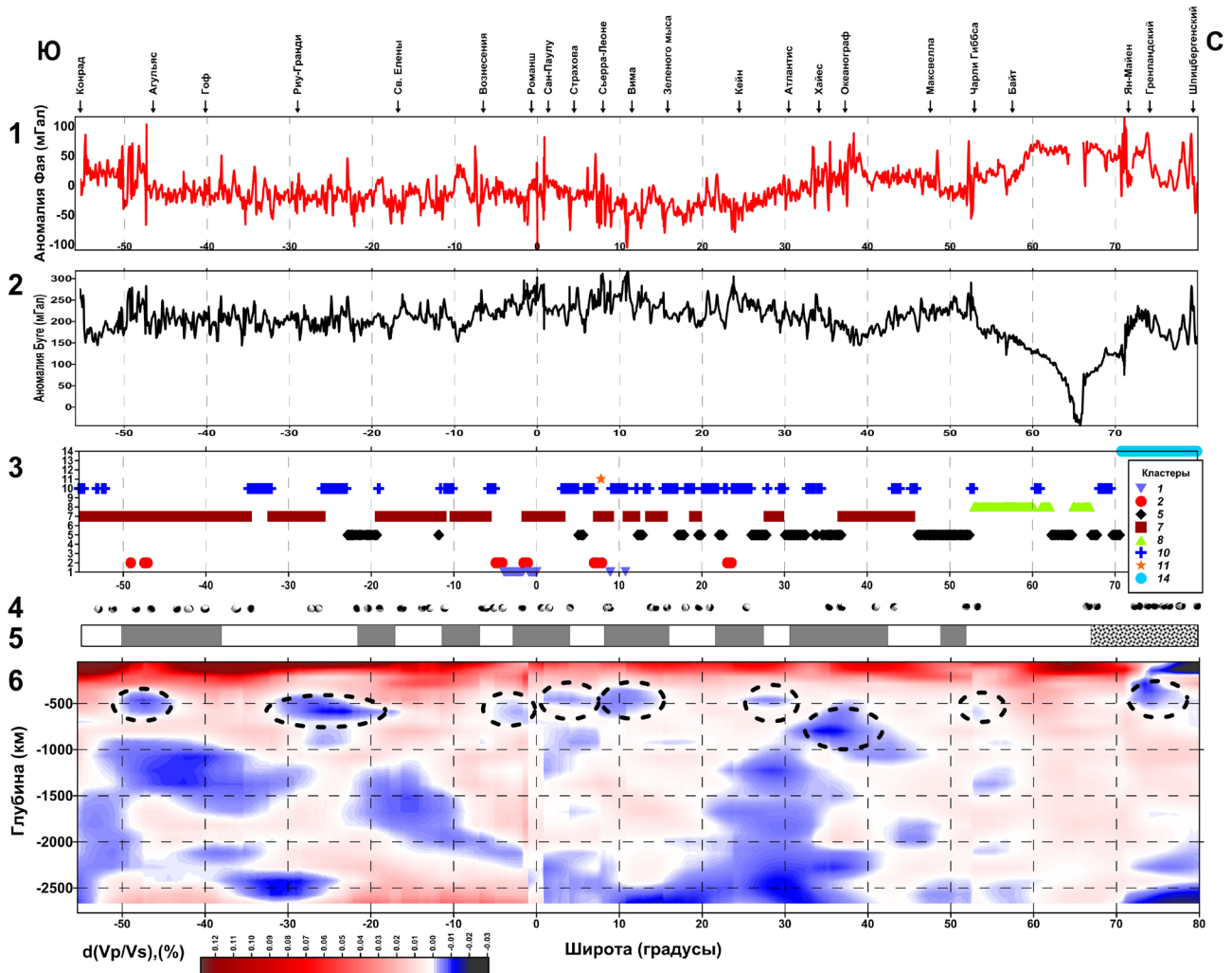


Рис. 2. Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ по данным (Соколов, 2007, 2009а, 2009б, 2011) с изменениями. Графики сопоставляемых параметров: 1 — значения гравитационных аномалий в свободном воздухе (мГал) (Sandwell, Smith, 1997), стрелками показано пересечение с САХ и названия основных трансформных разломов; 2 — значения аномалий Буге (мГал); 3 — распределение кластеров осевой группы вдоль САХ по данным (Sokolov et al., 2008). По вертикали отложены номера кластеров, пояснения даны в тексте; 4 — нетипичные для осевой части механизмы очагов землетрясений в проекции на ось САХ по данным (Harvard CMT Catalog, 2007); 5 — положение литосферы преддугового типа восточной периферии САХ в проекции на ось САХ по интерпретации кластерного анализа (Sokolov et al., 2008); 6 — вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмотомографическим данным для Р и S волн (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997), пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии в экваториальной и северной Атлантике.

мелкомасштабном уровне помимо продуктивности магматизма, связанного с плюмовыми источниками (Дмитриев и др., 2006). Области литосферы с более холодной мантией характеризуются пониженным и более дифференцированным значением аномалий в свободном воздухе, которые занимают практически всю центральную и в значительной степени южную Атлантику (Соколов, 2007).

Распределение кластерных сочетаний геофизических параметров вдоль САХ (рис. 2, гр. 3) показывает, что по данным (Соколов, 2007; Sokolov et al., 2008) главными являются кластеры 5, 10 и 7. Кластер 5 является проявлением экстре-

мальных значений теплового потока и томографии, свойственных областям плюмов. Он характеризует наиболее прогретые участки САХ с наиболее глубинным магматизмом и повышенным фоном низкоамплитудной сейсмичности (рис. 3). Последнее происходит из-за того, что в областях литосферы с пониженной вязкостью сильные напряжения не накапливаются, и происходит частая разрядка накопленной энергии в слабых сейсмических событиях. В условиях холодной, жесткой литосферы землетрясения происходят сравнительно редко, но обладают повышенной магнитудой. В условиях отсутствия плюмовых аномалий томографии и преобладания базальтов

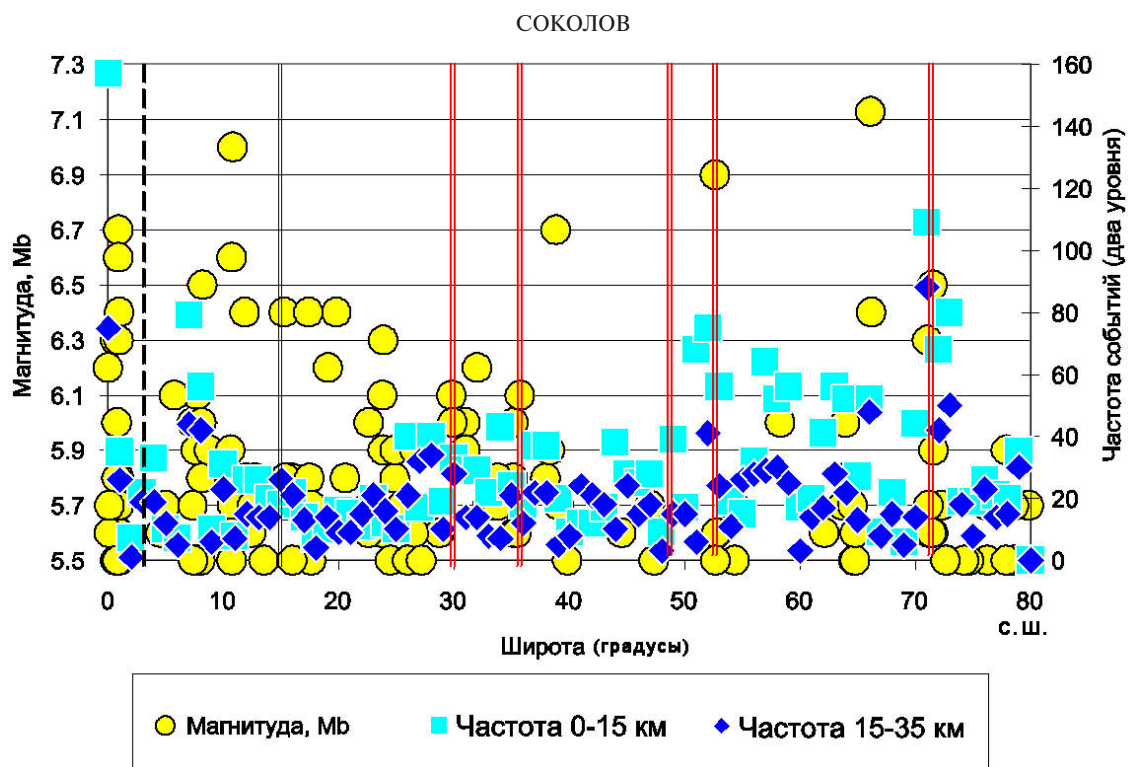


Рис. 3. Магнитуда и частота землетрясений на двух уровнях глубины (ANSS, выборка 1997 г.) вдоль осевой зоны САХ от экватора до 80° с.ш. по данным (Дмитриев и др., 1999).

спрединговой ассоциации (часть профиля рис. 3 от 0° до ~30° с.ш.) магнитуда землетрясений повышена (преобладают светлые кружки), а частота их на обеих категориях глубины понижена, по сравнению с сегментом САХ с плюмами (севернее 30° с.ш.). Такое объяснение не противоречит существующим сейсмологическим моделям (Болдырев, 1998) и является одним из признаков корреляции петрологических и геофизических параметров. Также следует отметить (Дмитриев и др., 1999), что в условиях плюмовой ассоциации наблюдается явное преобладание частоты слабых мелкофокусных событий над более глубинными, что говорит о большей подвижности верхней части литосферы САХ в зоне плюмов, чем в зоне спрединговой ассоциации. Отмеченный выше общий тренд распределения сейсмичности в зоне плюмов нарушается узкими «всплесками» событий с большой магнитудой в районах Азорских островов, Исландии и разлома Чарли Гиббс, и сопутствующими им «всплесками» числа глубинных событий. Азорские острова в меньшей степени иллюстрируют указанные «всплески» как по магнитуде так и по числу событий и находятся как бы в промежуточном положении по рассматриваемым характеристикам.

Кластер 10 (рис. 2, гр. 3) имеет интерпретацию, сходную с кластером 5, но представляет менее контрастные значения тех же параметров. Его положение на САХ обрамляет участки проявления плюмов по положению кластера 5 и показывает наличие слабопрогретых локальных

участков САХ, которые по своему масштабу не могут быть названы плюмами (Sokolov et al., 2008). К числу кластеров с экстремальными плюмовыми значениями должен быть отнесен также кластер 8, проявленный в районе Исландии (Соколов, 2007). Кластер 7 показывает участки САХ со значениями параметров, противоположными плюмовым областям, и в целом маркирует проявления холодной и жесткой литосферы вдоль хребта на различных глубинах до 1500 км, что хорошо согласуется с общей картиной по гравитационным аномалиям Буге (рис. 2, гр. 2). Кластеры 2, 11, 14 представляют собой переходные сочетания параметров между САХ и котловинами, изредка подступающие к оси САХ. Их проявления на САХ весьма редки. Таким образом, выявленные вдоль оси САХ литосферные геодинамические типы имеют причинно-следственную привязку к сейсмической томографии, показывающей суперпозицию «холодных» линз и плюмов, имеющих глубинные корни.

ДАННЫЕ GPS И АНОМАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ВДОЛЬ САХ

Как было указано, формирование кластерного сочетания геофизических параметров, свойственного преддуговым зонам, и его пространственная синхронизация с зонами повышенной макротрещиноватости может возникать из-за наличия существенной субмеридиональной компоненты современных движений, приводящей к

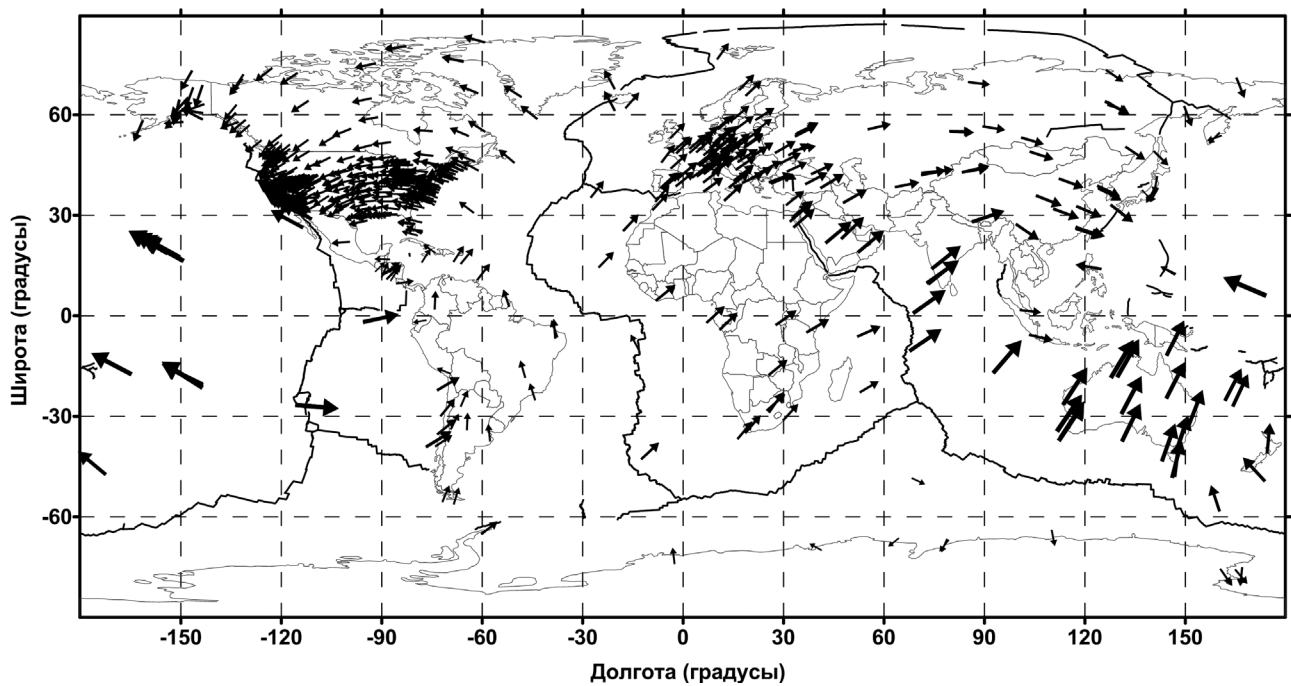


Рис. 4. Направление и модуль скорости горизонтальных движений в точках опорных пунктов измерений по данным (GPS, 2008). Размер стрелки пропорционален скорости движения.

возникновению субширотных зон с активацией напряжений сжатия (Соколов, 2009а, 2009б, 2011), и соответствующих деформаций. Направления и модули скоростей горизонтальных движений в точках опорных пунктов измерений данных GPS (рис. 4) показывают, что картина современных движений в Атлантике отличается от предполагаемых направлений движения, выведенных из последовательности линейных магнитных аномалий. В частности, в эпоху до GPS предполагалось, что вектора движения спредингового конвейера от САХ являются субширотными. Полученная к настоящему моменту картина векторов (рис. 4) показывает, что около 75% континентального обрамления Атлантики (Южная Америка, Африка, Европа) имеют азимут движения преимущественно $\sim 45^\circ$, о. Вознесения и восточная часть Южной Америки — $\sim 350^\circ$. Это говорит о том, что субширотная и субмеридиональная компоненты движения приблизительно равны, что при структурированности литосферы субширотными трансформными зонами и разности амплитуд движений может привести к сдвиговым смещениям по этой разломной сети, включая пассивные зоны. Северо-западное обрамление Атлантики имеет направление движение, отличное от остальной части и в первом приближении соответствует первоначальной теории. С учетом субмеридиональной компоненты движения остальной части плит Атлантики можно предположить, что текущим геодинамическим режимом вдоль разломных зон, разграничивающих упомянутые плитовые сегменты, является транс-

прессия при сохранении режима растяжения вдоль САХ.

Одним из маркеров процесса растяжения океанического бассейна со спрединговым центром вдоль САХ и сдвигом по трансформным разломам является сейсмичность с вполне определенными типами механизмов очагов землетрясений. Типичный набор этих механизмов для САХ представлен на рис. 5 (Harvard CMT Catalog, 2007), который показывает, что большинство сейсмических событий соответствуют геодинамической модели с растяжением и сдвигом. Сейсмические события для расчета параметров в очаге для базы Harvard CMT тщательно отбираются, поэтому нетипичные для зоны САХ и периферии океана механизмы, проявленные концентрированно в пространстве, должны рассматриваться как явление статистически достоверное. На рис. 5 наблюдается несколько кластеров событий с механизмом типа «взброс», несколько механизмов с неширотной ориентацией растяжения и сдвигов на траверсе разлома Зеленого Мыса и северным обрамлением желоба Пуэрто-Рико. Вдоль оси САХ сильные сейсмические события с типичными кинематическими типами механизма очага (сброс и сдвиг по офсетным зонам разломов) составляют 90% выборки. На 10% остаток приходятся события с механизмами сжатия и растяжения по направлению, перпендикулярному оси САХ.

Проявления нетипичных событий, как локальные или региональные отклонения геодинамических обстановок от фоновой (рис. 6) по положению очагов и механизмов, отфильтро-

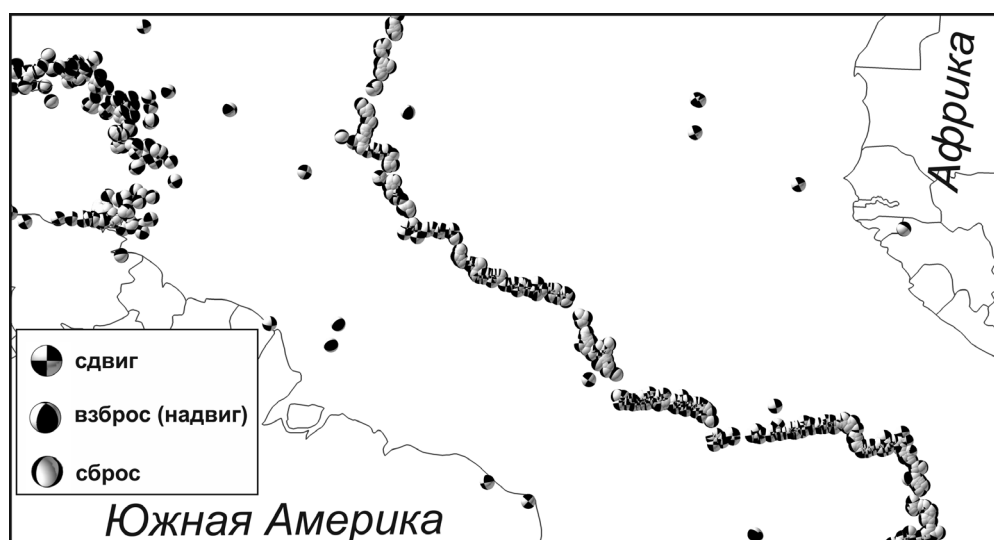


Рис. 5. Механизмы очагов сильных ($M > 4.7$) землетрясений по данным (Harvard CMT Catalog, 2007) в экваториальном сегменте Атлантики.

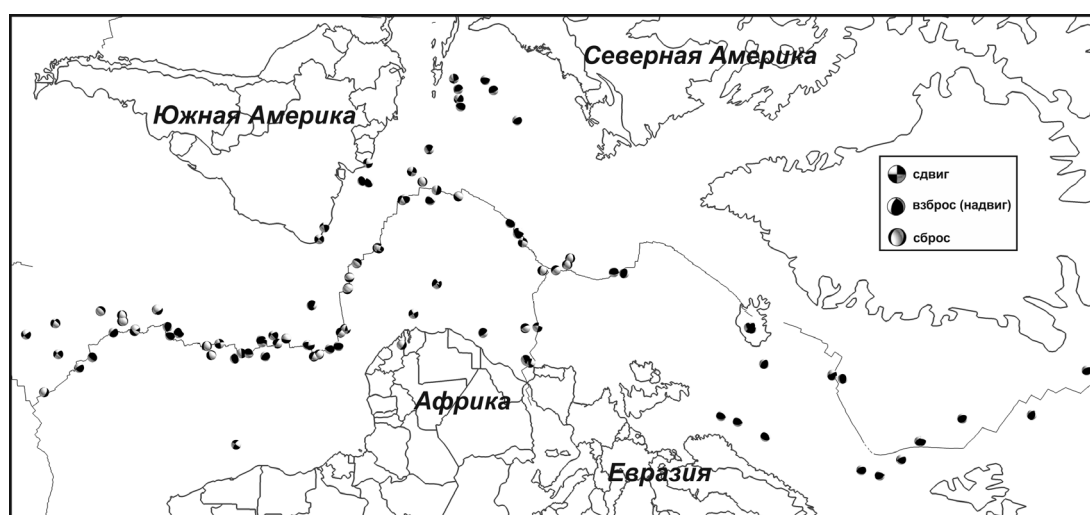


Рис. 6. Механизмы очагов сильных ($M > 4.7$) землетрясений, отличающихся от фонового по положению и типу механизма, по данным (Harvard CMT Catalog, 2007) в Атлантике.

ванных от типичных, показывают следующее. В районе хребта Книповича вдоль оси сбросовые механизмы ориентированы не перпендикулярно структуре, а под углом около 45° . Кроме того (рис. 6) имеется набор взбросовых событий, ориентированных вдоль линии, пересекающей хребет под углом около 40° в северо-западном направлении. Подобная картина заметно отличается от фоновой в Атлантике. Она соответствует системе макротрещиноватости, возникающей вероятнее всего в сдвиговых зонах (Соколов, 2011). Нетипичные для осевой части механизмы очагов землетрясений в проекции на ось САХ показаны на рис. 2 на гр. 4.

Нетипичные механизмы очагов распределены в пространстве с большей концентрацией в областях с повышенной плотностью разломных зон, наличию кластера с «преддугowymi» свойствами и «холодных» линз в мантии (рис. 2, гр. 5)

и заметно меньшей концентрацией в плюмовых сегментах, что вполне объяснимо пониженной вязкостью мантии. Данная пространственная взаимосвязь позволяет определить ее как зону активации напряжений и деформаций (Соколов, 20096). Эти зоны по данным (Соколов, 2007) сопряжены с наличием надвиговых структур, выявленных сейсморазведкой, и по данным (Мазарович, Соколов, 2004) сопряжены с новейшими деформациями осадочного чехла, имеющими анизотропию структурной ориентации. Эти факты позволяют обоснованно говорить именно об активации напряжений и деформаций на пространстве от САХ до континентального склона за счет наличия субмеридиональной компоненты вектора движения.

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о том, что геодинамический фактор, ответственный за механизмы сейсмических

событий фонового типа, продолжает действовать, но к нему добавлено действие другого фактора, из-за которого появились аномальные механизмы очагов и другие явления, наложенные на основную картину. Таким образом, обнаруживается действие дополнительного источника тектогенеза, взаимодействие которого с фоновым могло бы объяснить наблюдаемую фактуру. Таким дополнительным источником тектогенеза может быть субгоризонтальное действие растекающегося в верхах мантии вещества суперплюмов: Африканского и отрогов Тихоокеанского. Особо подчеркнем, что «растекание» плюмов по поверхности и их взаимодействие с плитами с одной стороны, и горизонтальные перемещения плит с другой, рассматриваются как независимые процессы, известные как плюм-тектоника и плейт-тектоника. В виду отсутствия под САХ глубоких «горячих» корней источником основного движения плит может быть ротационный фактор (Соколов, 2008). Он же теоретически может сформировать как фоновую (субширотную), так и субмеридиональную (нетипичную) компоненту движения, хотя существенный вклад в последнюю может быть сделан плюмами. Ротационный механизм формирует тангенциальные силы, действующие на каждый элемент «незакрепленных» плит или их блоков, аналогично объемным силам. Учитывая блоковый и расслоенный характер строения коры и верхней мантии, действие тангенциальных сил ротационного происхождения может приводить к перемещениям блоков внутри крупных плит и разнообразным тектоническим деформациям на внутриплитном пространстве, а также формировать условия дифференциро-

ванного горизонтального смещения масс. Таким образом, существуют обоснованные предпосылки для независимых движений мелких блоков и пластин в любой области крупной плиты с формированием различных типов деформаций.

ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ СПРЕДИНГА ВДОЛЬ САХ

Индикатором горизонтального дифференцированного смещения внутри плиты является различная скорость спрединга на разновозрастных участках вдоль изохрон параллельно САХ. По данным (Машенков и др., 1992) (рис. 7) значения скоростей спрединга для сегмента южной Атлантики между 12° и 17° ю.ш. при возрастах от современных до 20 млн лет, полученные по корреляции модуля полного вектора аномального магнитного поля (АМП), показывают расхождения кинематики соседних спрединговых сегментов, разделенных трансформными разломами, более чем в два раза. В этой ситуации будут происходить сдвиговые деформации не только на активных участках разломов благодаря стандартному механизму при одинаковой скорости, но и вне их пределов по обе стороны от САХ из-за дополнительной сдвиговой амплитуды, приобретаемой от разницы скоростей. Эта амплитуда по мере удаления от активного сегмента САХ должна затухать или рассеиваться (Тевелев, 2005). Для реализации процесса затухания необходимо дополнительное пространство, сопоставимое с размером сдвигового сегмента. Сдвиговые деформации могут охватывать внутриплитные районы, пассивные части трансформных разломов с пространством,

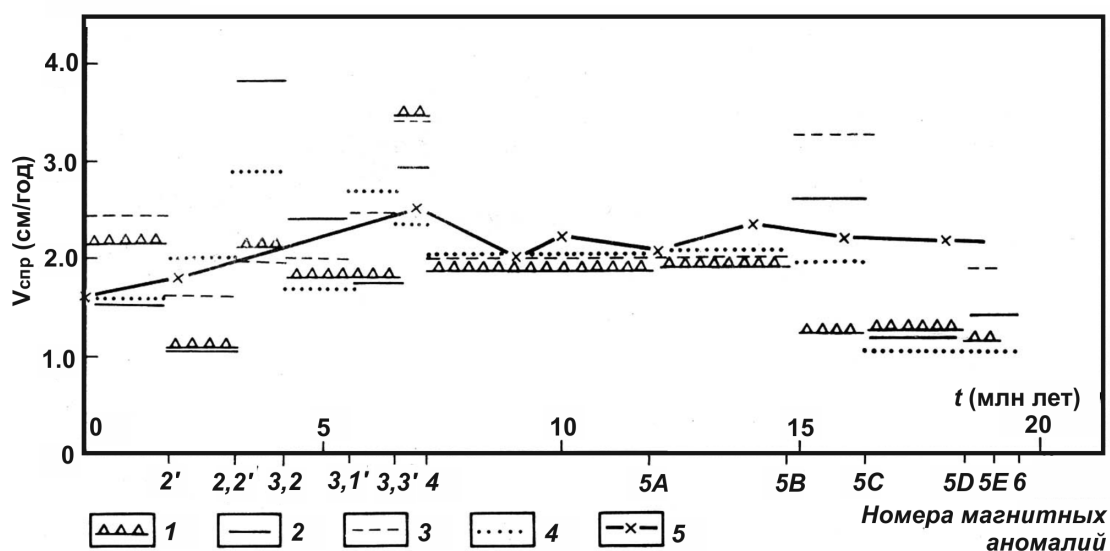


Рис. 7. Кинематические характеристики спрединга в районе Южно-Атлантического хребта (12°–17° ю.ш.) (Машенков и др., 1992): 1 — севернее разлома Северный Кардано; 2 — между разломами Северный Кардано и Кардано; 3 — между разломами Кардано и Святой Елены; 4 — южнее разлома Святой Елены; 5 — значения скорости.

прилегающим к ним, и быть выраженными в осадочном чехле. При объяснении механизма деформаций используется в основном сжатие или растяжение, ортогональное САХ. По всей видимости, предположение о возможной сдвиговой природе внутриплитных деформаций осадочного чехла в Атлантике впервые высказано в работе (Мазарович, 2000).

Сопоставление атрибутов вдоль САХ между 55° ю.ш. и 80° с.ш. (Соколов, 2016) с разрезом вариации отношения скоростей продольных и поперечных волн от поверхности до подошвы мантии, рассчитанным по авторской методике (Соколов, 2014) показывает следующее. Этот сейсмический атрибут интерпретируется как показатель тектонической «подвижности» в мантии (рис. 8, гр. 6) и его минимумы — зоны пониженной «подвижности», обведенные пунктирными областями — соответствуют «холодным» линзам, расположенным преимущественно в диапазоне глубин 400-700 км. Исключение составляет «холодная» линза под Азорским

плюмом, которая расположена от 700 до 1000 км. Плотность разломных зон вдоль САХ, длины которых (Соколов, 2007) показаны символами, пропорциональными общей длине разломов, показана на рис. 8 на гр. 5. Эта визуализация, как и на рис. 1 на гр. 4, для наглядности обведена огибающей кривой. Хорошо видны модуляции суммарных длин в виде цепочки максимумов, совпадающих в общих чертах с положением «холодных» линз под САХ. Это показывает прямую взаимосвязь между присутствием «холодных» линз в мантии и макротрещиноватостью литосферы. Особо отметим, что речь идет не о «холодных» литосферных блоках, а о «холодных» подлитосферных линзах. Другими словами, геодинамическое влияние на степень тектонической раздробленности литосферы и коры формируется также термальным состоянием мантии в слое мощностью около 300 км непосредственно над разделом 670 км и сохраняется при удалении от САХ в процессе спрединга. Для зоны САХ это может быть

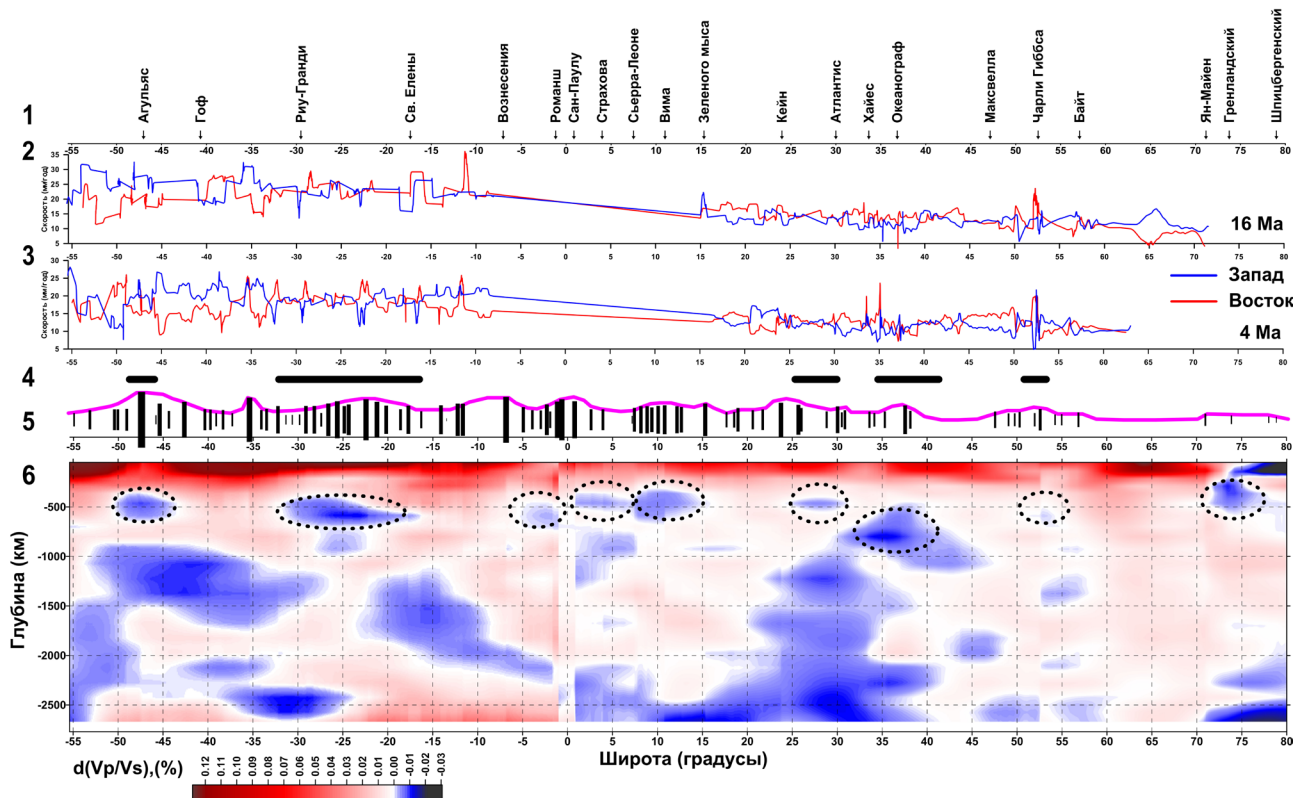


Рис. 8. Корреляция геолого-геофизических атрибутов вдоль оси САХ по данным (Соколов, 2016) с изменениями. Графики сопоставляемых атрибутов: 1 — положение на оси САХ пересечений с наиболее крупными разломами и их названия; 2, 3 — значения полускоростей спрединга (мм/год) вдоль изохрон 16 и 4 млн лет соответственно, показанные парами для западного (синяя линия) и восточного (красная линия) флангов САХ, построенные по данным (Muller et al., 2008) с фильтрацией интервала от 8° ю.ш. до 15° с.ш.; 4 — положение зон с минимальной асимметрией скорости спрединга для районов с достоверной идентификацией динейных магнитных аномалий; 5 — положения пересечений трансформных разломов с САХ с размером символа, линейно пропорциональным общей длине с пассивными частями, и их огибающая; 6 — вариации отношения V_p/V_s , рассчитанные по сейсмотомографическим данным для Р и S волн (Becker, Boschi, 2002; Grand et al., 1997; Van Der Hilst et al., 1997), пунктирными кругами обозначены «холодные» аномалии верхней мантии Атлантики под зонами САХ и его флангами.

объяснено тем, что в движение литосферных плит может быть вовлечен более мощный (до 400 км) поверхностный слой, повышенное трение подошвы которого в области «холодных» линз создает условие для образования повышенной макротрещиноватости. В пространстве между линзами мантия менее вязкая и число крупных разломов, а также их длина снижаются.

Значения полускоростей спрединга вдоль изохрон 16 и 4 млн лет соответственно, показанные парами для западного (синяя линия) и восточного (красная линия) флангов САХ, построенные по данным (Muller et al., 2008) с фильтрацией интервала от 8° ю.ш. до 15° с.ш. (рис. 8, гр. 2–3) получены сечением матрицы полускоростей вдоль профилей положения указанных изохрон. Поскольку экваториальный сегмент в силу ряда причин содержит сильно фрагментированное АМП, сообщество, интерпретирующее коррелируемые аномалии, не выделяет в этом интервале надежных линейных аномалий и фактически этот интервал пуст в смысле данных для расчета матриц скоростей. Поэтому данный интервал не показан на графиках, имеющих следующие особенности. Хорошо видно регулярное увеличение скорости спрединга по мере удаления от полюса вращения плит, разделяемых САХ (около 60° с.ш.). На этом фоне имеют место локальные вариации полускоростей, достигающие ~100% вдоль простирания САХ и ~250% в разнице между западным и восточным флангами. Размеры сегментов с локальными вариациями полускоростей сопоставимы с глубинами кровли «холодных» линз, что говорит о сохранении главной масштабной сопоставимости глубин мантийных структур с размерами поверхностных.

Хорошо видна асимметрия скоростей на западном и восточном флангах (рис. 8, гр. 2, 8, гр. 3). Эта асимметрия сводится практически к нулевой разнице на некоторых сегментах САХ, положение которых (рис. 8, гр. 4) хорошо совпадает с «холодными» линзами и максимумами модуляции трансформных разломов. Между линзами асимметрия полускоростей спрединга достигает максимальных значений, причем западный фланг САХ в южном полушарии имеет большие значения, чем восточный. В северном полушарии встречаются преобладания скоростей и на восточном фланге. Отметим отрицательную корреляцию максимумов полускоростей на западном фланге и минимумов на восточном. Для изохроны 16 млн лет на востоке имеется смещение к северу всей системы данных относительно запада, поэтому графики данных (рис. 8, гр. 2) выглядят смещенными по широте. Смещение западной кривой на север на величину около 120 км привело бы данные по этой изохроне

к виду с отрицательной корреляцией, близкой к 1, как и для изохроны 4 млн лет. Это означает, что суммарное спрединговое перемещение, сопровождающееся определенным объемом горизонтальной аккреции коры, несмотря на асимметрию полускоростей остается более или менее одинаковым и резкого скачка в продуктивности магматизма, поставляющего материал для формирования коры, не наблюдается. В пределах плиты имеются сегменты с различной кинематикой и преимущественным направлением этого процесса (горизонтальные «клавиши»). То есть, сегменты САХ обладают различными и независимыми друг от друга кинематическими характеристиками, что подтверждает тезис о неоднородной и «нежесткой» структуре плит и о возможности в их пределах независимого движения частей под действием сил объемного типа с горизонтальной компонентой. Эти процессы усилены в областях между «холодными» подлитосферными линзами и в местах выхода в САХ глубинных аномалий типа «плюм».

Сравнение профилей полускоростей для изохрон 16 и 4 млн лет показывает, что имеются сегменты, где преимущественно западное преобладание увеличенных скоростей претерпело инверсию и на момент изохроны 16 млн лет преобладание было на восточном фланге и наоборот. Например сегмент от 52° до 49° ю.ш. 4 млн лет имел восточное преобладание полускорости, но 16 млн лет преобладание было западным. Сегменты от 41° до 37° ю.ш. и от 17° до 15° ю.ш. наоборот 4 млн лет имели западное преобладание полускорости, но 16 млн лет преобладание было восточным. Указанные инверсии имеют место в пространстве между «холодными» подлитосферными линзами. Очевидно зоны пониженной вязкости мантии усиливают нестабильность и вариации кинематики преимущественного направления процесса спрединга по сравнению с «холодными» зонами. Не исключена миграция «холодных» линз в пространстве или их появление (исчезновение).

Как было отмечено, при неоднородном профиле скорости вдоль сегментов САХ должны возникать сдвиги между блоками, выраженные деформациями в рельефе кровли базальтового слоя и соответственно в покрывающем его осадочном чехле, где он успел сформироваться. На остаточном рельефе осевой зоны САХ и флангов между 7° и 24° ю.ш., полученном высокочастотной фильтрацией полного рельефа (GEBCO, 2014) на 30-секундной матрице для длин волн менее 75 км (рис. 9) для сравнения с рис. 8 гр. 2 показано положение изохроны 16 млн лет. Отчетливо видны трог трансформных разломов, выраженные протяженными и практически прямыми отрицательными аномалиями рельефа, между

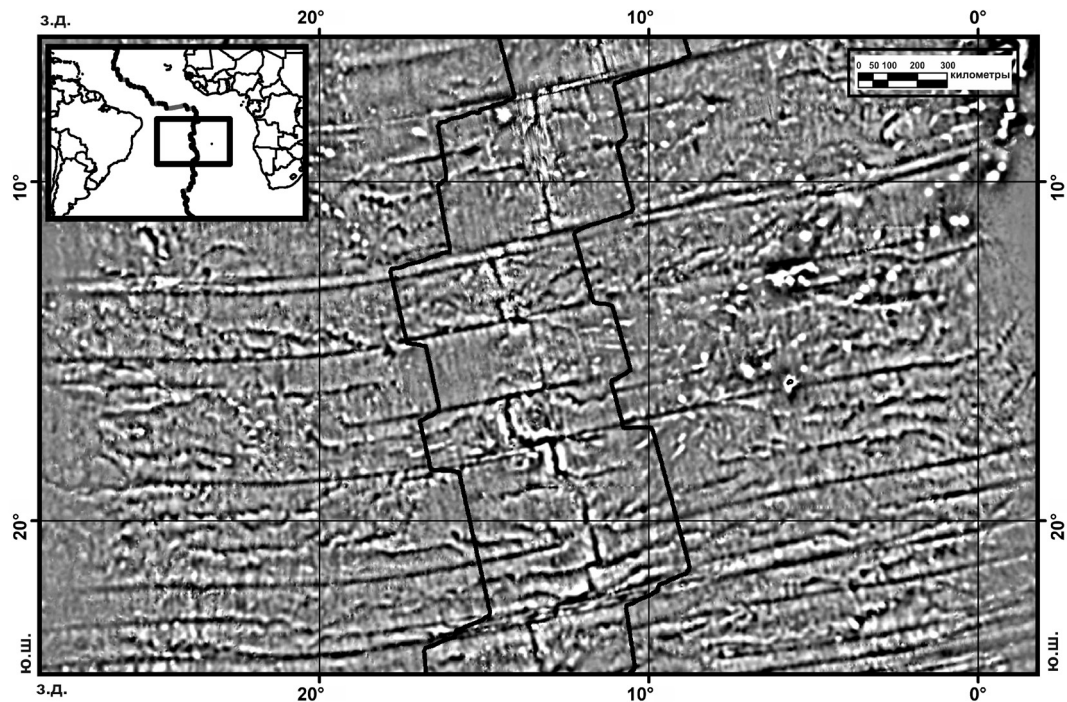
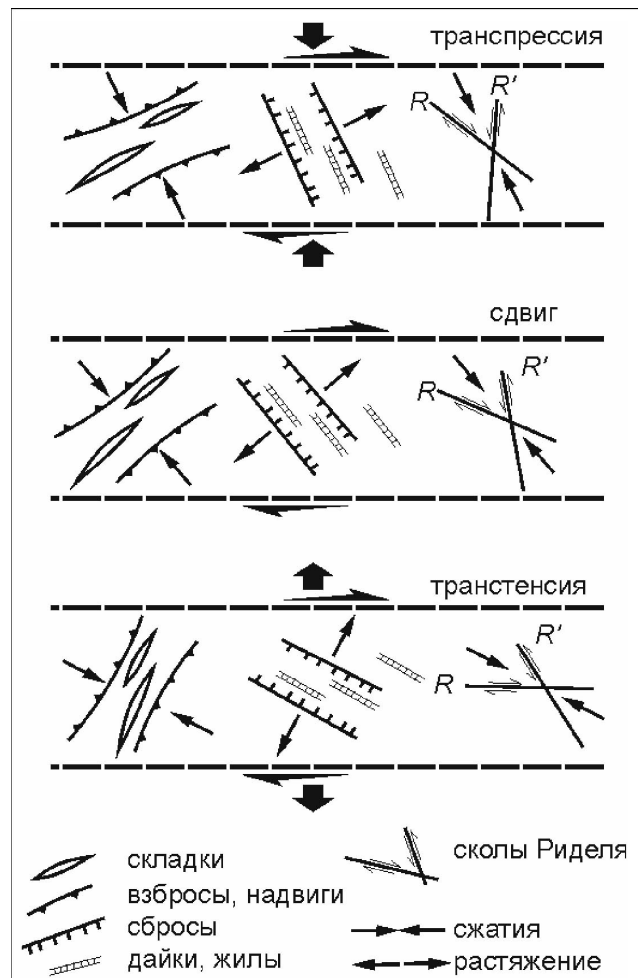


Рис. 9. Остаточный рельеф осевой зоны САХ и флангов между 7° и 24° ю.ш., полученный высокочастотной фильтрацией полного рельефа (GEBCO, 2014) на 30-секундной матрице значений для длин волн менее 75 км. Жирными линиями показано положение изохроны 16 млн лет с обоих флангов САХ. Среднеквадратичный разброс значений остаточного рельефа составляет ± 232 м, минимальные и максимальные значения — около ± 5000 м.

которыми в ряде межразломных сегментов наблюдаются множественные «извилистые» трог аналогичной амплитуды, которые называют дискордантными. Их траектория не может быть объяснена в рамках общего искривления траектории трансформной зоны (flow line) за счет изменения режима перемещения плит, описываемого миграцией полюса вращения. Возможной интерпретацией их происхождения является разница скоростей соседних сегментов, приводящая к сдвиговым смещениям вдоль трансформных разломов и сопряженным зонам растяжения под углом 25–45° к сдвиговому разрыву, на сегментах, к нему прилегающих. Формирование таких структур можно проиллюстрировать схемой рис. 10 (Кирмасов, 2011). При этом дискордантные образования образуются в сегменте с более медленной скоростью. Это в наиболее контрастном виде фиксируется в интервале от 17° до 13° ю.ш. на западном фланге САХ на изохроне 16 млн лет: значение полускорости к югу от 15° ю.ш. (рис. 8, гр. 1) превышает полускорость к северу от этой широты и при этом более высокоскоростной сегмент менее деформирован (рис. 9). Зеркальный участок на восточном фланге при этом имеет меньшую полускорость и в его пределах проявлены дискордантные нарушения.

Рис. 10. Ориентировка основных структур сдвигового парагенеза в зависимости от других компонент напряжения (Кирмасов, 2011, с изменениями).



С позиций скоростной дифференциации, эволюционирующей во времени, можно объяснить наличие разломов «отшельников» по определению (Мазарович, 2000), представленных прямыми трогами, не имеющими связи с осевой зоной САХ. Подобная структура отмечается в пределах упомянутого выше интервала от 17° до 15° ю.ш. на расстоянии около 400 км к западу от САХ. Ее исчезновение около 20 млн лет назад может быть связано с относительным выравниванием полускоростей спрединга на сопредельных сегментах, на которых в более ранний период имела разницу. При этом северная часть была более скоростной, если судить по наличию дискордантных нарушений в южной. Частая смена относительных скоростных режимов в многочисленных сегментах САХ привела к формированию мозаичной картины рельефа океанического субстрата, представленного чередованием участков с насыщением дискордантными нарушениями и их отсутствием. Таким образом, помимо АМП, остаточный рельеф является основой для восстановления детальной кинематической эволюции спредингового субстрата, деформаций осадочного чехла и характера палеонапряжений. Насыщенность дискордантных нарушений является параметром определяющим зональность литосферы по ее деформированности. Данные процессы могут происходить в каждом сегменте литосферы Атлантики, определяемом трансформными разломами, но наличие «холодных» подлитосферных линз и менее вязкой мантии в промежутках между ними может активизировать процессы на этих интервалах и усилить асимметрию движения.

Сопоставление материалов корреляции геофизических атрибутов (рис. 8) с данными классификации геодинамических типов литосферы Атлантики (Sokolov et al., 2008) показывает, что за пределами осевой зоны САХ — на его флангах и в зоне абиссальных холмов (до 1200 км от САХ) — кластеры геофизических параметров обладают меридиональной дифференциацией, совпадающей с наличием «холодных» подлитосферных линз (рис. 2). Основное различие этих кластеров состоит в среднем тепловом потоке, определяемом по площадям до нескольких миллионов км². Для зон с линзами он составляет 52 мВт/м², а для промежуточных зон с пониженной вязкостью — 67 мВт/м². Из этого следует, что характеристики поверхностной макротрещиноватости, зональности литосферы по степени деформированности, энерговыделение через поверхность и сейсмотомаграфические аномалии связаны в более или менее непротиворечивую причинно-следственную цепочку, позволяющую судить о влиянии геодинамического состояния мантии на поверхностные структуры.

ИНТЕНСИВНОСТЬ АМП И СОДЕРЖАНИЕ ЖЕЛЕЗА В БАЗАЛЬТАХ ВДОЛЬ САХ

Зависимость интенсивности АМП в осевой зоне севера САХ от содержания железа в базальтах должно существовать с необходимостью, поскольку оно составляет основу материала, из которого формируется магнитоактивный слой. Наличие связи содержания железа в разных типах базальтов с намагниченностью, измеренной в образцах, показано в работе (Верба и др., 2000). Статистические значения содержания железа в закалочных стеклах базальтов различных типов плюмовой (ТОР-1, ТОР-К, ТОР-Fe) и спрединговой (ТОР-2, ТОР-Na, ТОР-FeTi) ассоциаций приведены в работе (Дмитриев и др., 2006). На пространстве САХ от Исландии и ее окрестностей до медленно-спредингового хребта Книповича обнаружены все вышеперечисленные типы. По химическому составу стекол эти типы базальтов особо контрастны по содержанию железа: вариация средних значений составляет 4.8% (от 9.4% ТОР-К до 14.2% ТОР-FeTi) при среднеквадратичном разбросе около 1.2%. Превышение вариации параметра над его погрешностью позволяет искать осмысленные статистические тренды, в отличие от противоположных случаев.

Корреляция значений АМП, FeO и типов базальтов вдоль САХ (рис. 11) показывает сходство графика АМП по данным (Maus et al., 2009) по профилю вдоль осевой аномалии с содержанием FeO, в особенности севернее 65° с.ш. Также хорошо видно, что эта корреляция обеспечена наличием контрастных (по FeO и по глубинности) типов базальтов. Южнее в зоне САХ были подняты базальты типов с меньшей вариацией содержания FeO, поэтому установить достаточно четкий тренд с АМП не удастся. В северном сегменте САХ наблюдается очевидная взаимосвязь содержания FeO и глубинных плюмовых аномалий сейсмотомаграфического атрибута (рис. 8, гр. 6) в районе Исландского и Азорского плюмов. Аналогичным образом выделяются аномалии АМП.

Корреляция АМП с содержанием FeO в закалочных стеклах приведена на рис. 12. Там же показана дифференциация проб по типам базальтов. Основная часть проб стекол, где обнаружены только малоглубинные ТОР-Na и ТОР-2 спрединговой ассоциации, на диаграмме выражена плотным облаком точек, в пределах которого тренд не установлен. При появлении в образцах плюмовых базальтов, указывающих на совместное магмообразование в САХ из двух различных по глубинности источников (Силантьев, 2008), и крайних разностей — ТОР-К и ТОР-FeTi, вариация FeO от АМП формирует заметный

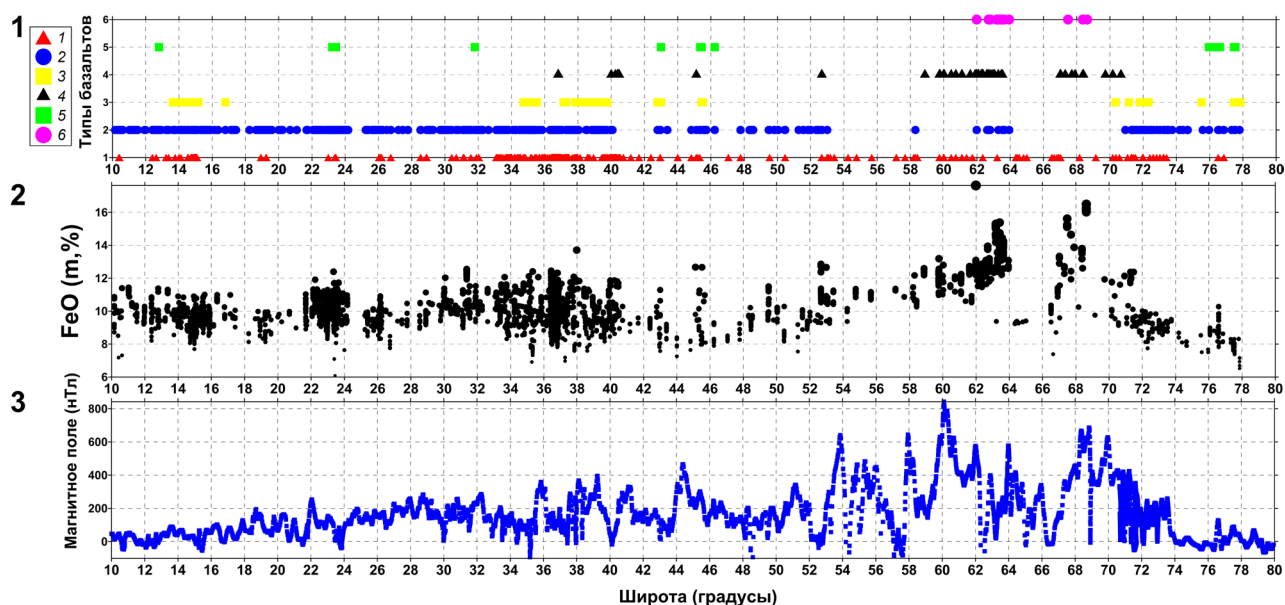


Рис. 11. Распределение типов базальтов, FeO и АМП вдоль САХ от 10° до 80° с.ш. Графики сопоставляемых параметров: 1 — типы базальтового магматизма по данным (Дмитриев и др., 2006): 1 — TOP-1, 2 — TOP-2, 3 — TOP-K, 4 — TOP-Fe, 5 — TOP-Na, 6 — TOP-FeTi; 2 — значение FeO (м, %) в закалочных стеклах (Соколов, Силантьев, 2011); 3 — значение АМП вдоль оси САХ (нТл) (Maus et al., 2009).

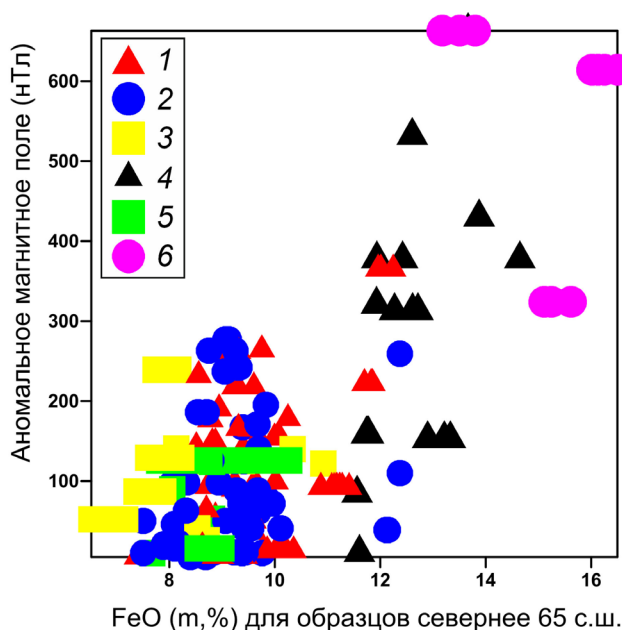


Рис. 12. Корреляция АМП с содержанием FeO в закалочных стеклах с дифференциацией по типам базальтов (Соколов, Силантьев, 2011). Типы базальтового магматизма (Дмитриев и др., 2006): 1 — TOP-1, 2 — TOP-2, 3 — TOP-K, 4 — TOP-Fe, 5 — TOP-Na, 6 — TOP-FeTi.

псевдолинейный тренд, который может быть оценен количественно. Это позволяет в районах с проявлением плюмового типа базальтов проводить их типизацию по магнитному полю, что особенно актуально в малодоступных для пробоотбора районах.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВДОЛЬ САХ

Корреляция геофизических полей, сейсмичности и гидротермальных проявлений вдоль оси САХ (рис. 13) с сейсмической томографией показывает связь этих параметров с грани-

цами распространения плюмовых аномалий. Для сравнения гидротермальных проявлений с упомянутыми атрибутами в работах (Мазарович, Соколов, 1998; Mazarovich, Sokolov, 2002) была взята модель RG5.5 (Zhang, Tanimoto, 1992). На этом профиле отчетливо видны три минимума (рис. 13, гр. 3), соответствующие (с севера на юг) Исландскому и Азорскому плюмам и южно-атлантическому осевому минимуму. Отметим совпадение главных зон минимумов аномалии Буге с соответствующими минимумами томографического разреза, представленными зонами разуплотненной мантии. Конфигурация отрицательных томографических аномалий «горячего» мантийного вещества плюмов имеет форму ответвлений от глубинного канала, смотрящих на юг и указывает на вдольосевое перетекание прогретых масс. Сказанное не противоречит имеющимся литературным данным о южной миграции Азорского плюма (Дмитриев и др., 2001; Cannat et al, 1999; Dmitriev et al, 2001a, 2001b).

Распределение сейсмичности вдоль хребта (рис. 13, гр. 2) имеет форму концентрированных кластеров размером около 1.5–2°, к промежуткам между которыми тяготеют известные проявления сульфидной минерализации и других явлений связанных с ней (Мазарович, Соколов, 1998; Mazarovich, Sokolov, 2002). Рассматривая

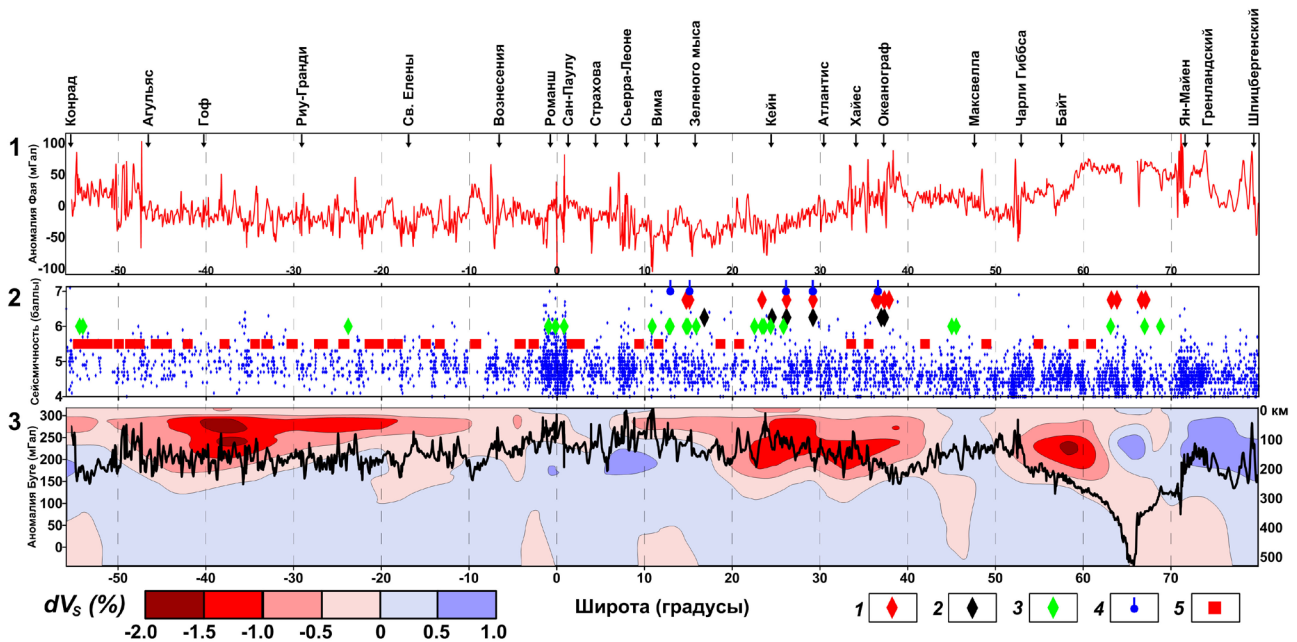


Рис. 13. Корреляция геофизических полей, сейсмичности и гидротермальных проявлений вдоль оси САХ (Mazarovich, Sokolov, 2002) с изменениями. Графики сопоставляемых параметров: 1 — аномалия силы тяжести в свободном воздухе по данным спутниковой альтиметрии (Sandwell, Smith, 1997) и пересечения САХ трансформными разломами; 2 — сейсмичность вдоль САХ (ANSS, выборка 2001), гидротермальные проявления и их прогноз: 1 — активные гидротермальные проявления; 2 — пассивные гидротермальные проявления; 3 — сульфидные оруденения; 4 — метановые «факелы»; 5 — районы, перспективные на сульфидную минерализацию или гидротермальную активность; 3 — разрез вариаций скоростей поперечных волн по данным сейсмотомографической модели RG5.5 (Zhang, Tanimoto, 1992) в верхней мантии (0–500 км) и аномалии Буге.

относительно хорошо изученную Северную Атлантику необходимо отметить, что проявления сульфидной минерализации тяготеют не просто к зонам пониженной частоты сильной (для выборок событий > 4 баллов) сейсмичности, а к зонам, ассоциированным с плюмовыми явлениями в верхней мантии. На наш взгляд наиболее вероятным механизмом, реализующим эту связь, является то, что наличие плюма, продвигающегося на юг (или просто функционирующего) вдоль хребта приводит к возникновению дополнительной системы трещиноватости коры по периферии области его растекания или на фронте его продвижения. Это облегчает доступ воды, ее циркуляцию и обогащение компонентами, свойственными гидротермальным растворам (Мазарович, Соколов, 1998). Кроме того, интенсивный базальтовый магматизм плюмового типа, поставка в зоне плюма необходимых летучих компонент и повышенный тепловой поток создают дополнительные условия, способствующие гидротермальной активности. Зоны трещиноватости способствуют также развитию процессов серпентинизации и связанному с этим выделению метана (Дмитриев и др., 1999; Charlou et al, 1998). Отмечается также незначительное смещение на юг активных гидротермальных построек от пассивных, что также может свидетельствовать о миграции плюма и гидротер-

мальных систем, связанных с периферийной трещиноватостью на границе с «холодными» сегментами.

ВЫВОДЫ

«Холодные» по данным сейсмотомографии блоки верхней мантии мощностью около 300 км и средней глубиной около 500 км сопряжены в пространстве не только с длинными разломными зонами, но и с повышенной плотностью общих длин всех разломов, включая полиразломные и сдвоенные трансформные системы. Эта плотность велика, в частности, между сегментами, где ось САХ приобретает максимальное субширотное смещение. Средний шаг пространственных «пульсаций» плотности разломов составляет около 12° (1320 км).

Гравитационные аномалии в свободном воздухе и аномалии Буге, общая сейсмичность, общие длины трансформных разломов, типы магматизма и кластерные сочетания геолого-геофизических параметров вдоль оси САХ образуют систему фактов, имеющих непротиворечивую геодинамическую интерпретацию в терминах взаимодействия «холодных» участков верхней мантии с относительно жесткой литосферой с одной стороны и прогретых и подвижных с другой. Геодинамическое состояние верхней

мантии по сейсмотомографическим данным, определяет в целом наблюдаемое на поверхности распределение сопоставляемых вдоль оси САХ параметров.

Наличие субмеридиональной компоненты движения по данным GPS объясняет формирование кластерного сочетания геолого-геофизических параметров, свойственного преддуговым зонам. В сочетании с субширотной компонентой движения в областях «пульсаций» повышенной макротрещиноватости происходит активации напряжений сжатия, растяжения и соответствующих деформаций. Можно предположить, что текущим геодинамическим режимом вдоль разломных зон, разграничивающих плитовые сегменты Атлантики, является транспрессия при сохранении режима растяжения вдоль САХ.

Нетипичные механизмы очагов землетрясений распределены в пространстве флангов САХ с большей концентрацией в областях с повышенной плотностью разломных зон, с наличием кластера с преддуговыми характеристиками и «холодных» линз в мантии, и заметно меньшей концентрацией в плюмовых сегментах САХ, что связано с пониженной вязкостью мантии. Эта связь указывает на активацию напряжений и деформаций, сопряженных с наличием надвиговых структур, выявленных сейсморазведкой, и с новейшими деформациями осадочного чехла, имеющими анизотропию структурной ориентации.

Наряду с фоновым тектогенезом, формирующим структуры растяжения САХ и сдвига, обнаруживается действие дополнительного источника тектогенеза, взаимодействующего с фоновым и имеющего вдольосевой характер действия. Таким дополнительным источником может быть как субгоризонтальное вдольосевое растекание в верхах мантии вещества плюмов, так и ротационный фактор. Учитывая блоковый и расслоенный характер строения коры и верхней мантии, действие тангенциальных сил приводит к дифференцированному горизонтальному смещению масс внутри крупных плит и разнообразным тектоническим деформациям на внутриплитном пространстве.

Геодинамическое влияние на тектоническую раздробленность литосферы и коры формируется «подвижностью» мантии в слое мощностью около 300 км непосредственно над разделом 670 км. Для зоны САХ это можно интерпретировать двумя способами. Первый состоит в том, что в движение литосферных плит вовлечен поверхностный слой мощностью до 400 км, повышенное трение подошвы которого в области «холодных» линз создает условие для повышенной плотности макротрещиноватости. В пространстве между линзами мантия

менее вязкая и число крупных разломов, а также их длина снижаются. Второй вариант состоит в формировании аномалий в «горячих» блоках при фоновых значениях в «холодных». В этом случае вовлечение слоя мощностью 400 км не обязательно для обоснования наблюдаемых фактов.

Асимметрия полускоростей спрединга сводится практически к нулю на сегментах САХ, которые совпадают с положением «холодных» линз и максимумами плотности трансформных разломов. Между линзами асимметрия полускоростей достигает максимальных значений. Отрицательная корреляция максимумов полускоростей на западном и восточном флангах с устойчивым средним значением вдоль изохрон означает, что суммарное спрединговое наращивание коры остается стабильным вдоль САХ, но его сегменты обладают различными и независимыми друг от друга кинематическими характеристиками. Это подтверждает тезис о неоднородной и «нежесткой» структуре плит и о возможности независимого движения ее частей под действием сил объемного типа с горизонтальной компонентой.

При неоднородном профиле скорости вдоль сегментов САХ возникают сдвиги между блоками, выраженные деформациями в рельефе кровли базальтового слоя и соответственно в осадочном чехле, где он есть. Эти деформации выражены в остаточном рельефе на длинах волн менее 75 км. Разница скоростей соседних сегментов формирует сдвиговые смещения вдоль трансформных разломов и зоны растяжения под углом 25–45° к сдвиговому разрыву, которые формируют дискордантные образования в сегменте с более медленной скоростью. С тех же позиций скоростной дифференциации, эволюционирующей во времени, объясняется наличие разломов «отшельников». Наличие «холодных» подлитосферных линз и менее вязкой мантии в промежутках между ними активизирует процессы на сегментах САХ и усиливает асимметрию движения.

Существует корреляция значений АМП по профилю вдоль осевой аномалии САХ с содержанием FeO. Эта корреляция обеспечена наличием контрастных (по FeO и по глубинности) типов базальтов. В северном сегменте САХ наблюдается очевидная взаимосвязь содержания FeO и глубинных плюмовых аномалий сейсмотомографического атрибута в районе Исландского и Азорского плюмов. Плюмовые базальты, указывающие на магмообразование в САХ из различных по глубинности источников, увеличивают вариацию FeO и, соответственно, магнитное поле с заметным псевдолинейным трендом.

Конфигурация отрицательных томографических аномалий «горячего» мантийного вещества плюмов имеет форму ответвлений от глубинного канала, смотрящих на юг и указывает на вдоль-сековую миграцию Азорского и возможно Исландского плюмов в приповерхностной мантии. Проявления сульфидной минерализации тяготеют не только к зонам пониженной сейсмичности, но и к зонам, ассоциированным с плюмовыми явлениями в верхней мантии. Наличие плюма, приповерхностное ответвление которого продвигается на юг вдоль хребта приводит к возникновению дополнительной трещиноватости коры по границам области его растекания или на фронте его продвижения, что создает условия для функционирования гидротермальных систем и зон серпентинизации пород верхней мантии.

Автор выражает глубокую признательность А.О. Мазаровичу и С.А. Силантьеву за конструктивные замечания и советы, высказанные по содержанию статьи. Работа выполнена в рамках темы «Оценка связи рельефа дна Атлантического и запада Северного Ледовитого океанов, деформаций осадочного чехла, процессов дегазации и опасных геологических явлений с геодинамическим состоянием коры и верхней мантии» (государственная регистрация № 01201459183), а также при поддержке грантов РФФИ 15-05-05888, 14-05-00122 и Программы № 3 Президиума РАН «Мировой океан — многомасштабность, многофазность, многопараметричность».

Список литературы

- Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика срединно-Атлантического хребта. М.: НГК РФ, 1998. 124 с.
- Бонатти Э.* Происхождение крупных разломных зон, смещающих Срединно-Атлантический Хребет // Геотектоника. 1996. № 6. С. 5–16.
- Верба В.В., Аветисов Г.П., Степанова Т.В. и др.* Геодинамика и магнетизм базальтов подводного хребта Книповича (Норвежско-Гренландский бассейн) // Российский журнал наук о Земле. Т. 2. № 4. 2000. С. 303–312.
- Дмитриев Л. В., Соколов С. Ю., Мелсон В. Г. и др.* Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле. 1999. Ноябрь. Т. 1. № 6.
- Дмитриев Л. В., Базылев Б. А., Силантьев С. А. и др.* Образование водорода и метана при серпентинизации мантийных гипербазитов океана и происхождение нефти. // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 511–519.
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Короновский Н.В. и др.* Миграция Азорского суперплюма по данным о корреляции петрологических и геофизических параметров // Геология и геофизика срединно-океанических хребтов. Российское отделение InterRidge. (23–25 мая 2001 г.). С. 11.
- Дмитриев Л.В., Соколов С.Ю., Плечова А.А.* Статистическая оценка вариаций состава и Р-Т условий эволюции базальтов срединно-океанических хребтов и их региональное распределение // Петрология. 2006. Т. 14. № 3. С. 227–247.
- Кирмасов А.Б.* Основы структурного анализа. М.: Научный мир, 2011. 368 с.
- Мазарович А.О., Соколов С.Ю.* Тектоническое положение гидротермальных полей на Срединно-Атлантическом хребте // Литология и полезные ископаемые 1998. № 4. С. 436–439.
- Мазарович А.О.* Геологическое строение Центральной Атлантики: разломы, вулканические сооружения и деформации океанского дна. М.: Научный Мир, 2000. 176 с.
- Мащенко С.П., Литвинов Э.М., Горшков А.Г. и др.* Геофизические критерии выявления региональных обстановок, благоприятных для образования глубоководных полиметаллических сульфидов // Глубинное строение и геодинамика литосферы Атлантического и Тихого океанов. Под ред. И.С. Грамберга, П.А. Строева. М.: Наука, 1992. С. 151–178.
- Силантьев С.А.* Геохимические и изотопные черты продуктов магматизма рифтовой долины САХ в районах 12°49'–17°23'с.ш. и 29°59'–33°41'с.ш.: свидетельство двух контрастных источников родительских расплавов MORB // Петрология. 2008. Т. 16. № 1. С. 73–100.
- Соколов Н.С.* Корреляция геолого-геофизических параметров вдоль оси Срединно-Атлантического хребта и преддуговые обстановки на его восточном фланге // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. № 6. 2007. С. 42–46.
- Соколов С.Ю.* Новый механизм горизонтального движения тектонически активных масс земной коры и литосферы // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ХLI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 278–282.
- Соколов С.Ю.* Аномальные механизмы очагов землетрясений Атлантики и их геодинамическая интерпретация // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ГЕОС, 2009а. С. 153–155.
- Соколов С.Ю.* Аномальные механизмы очагов землетрясений вдоль Срединно-Атланти-

- ческого хребта и их геодинамическая интерпретация // Russian-RIDGE VI. Сборник тезисов. Санкт-Петербург, 6-7 июня. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2009б. С. 33–34.
- Соколов С.Ю. Маркеры действия разных геодинамических факторов в Атлантике: аномальные механизмы очагов землетрясений, плотность разломов и другие данные // Современное состояние наук о Земле. Международная конференция памяти В.Е. Хаина, 1-4 февраля, 2011. М.: МГУ, 2011. С. 1767–1770.
- Соколов С.Ю., Силантьев С.А. Зависимость интенсивности аномального магнитного поля в осевой зоне севера САХ от содержания железа в базальтах по данным составов закалочных стекол // Процессы в срединно-океанических хребтах – что нового дало первое десятилетие 21 века в их изучении? Рабочее совещание Российского отделения международного проекта Inter Ridge 1-2 июня 2011. М.: ИГЕМ РАН, 2011. С. 79–81.
- Соколов С.Ю. Состояние геодинамической подвижности в мантии по данным сейсмотомографии и отношению скоростей Р и S волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. № 2. Вып. 24. С. 55–67.
- Соколов С.Ю. Сдвиговый фактор тектогенеза в Атлантическом океане и его связь с геодинамическим состоянием верхней мантии и внутриплитными деформациями // Тектоника, геодинамика и рудогенез складчатых областей и платформ. Материалы XLVIII Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2016. Т. 2. С. 178–184.
- Соколов С.Ю., Зарайская Ю.А., Мазарович А.О. и др. Пространственная неустойчивость рифта в полиразломной трансформной системе Сан-Паулу, Атлантический океан // Геотектоника. 2016. № 3. С. 3–18.
- Тевелев А. В. Сдвиговая тектоника. М.: Изд-во МГУ, 2005. 254 с.
- ANSS Earthquake Composite Catalog. 2014. <http://quake.geo.berkeley.edu/anss/>, выборка 11.02.2014.
- Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2002. V. 3. P. 1–48. doi: 10.1029/2001GC000168.
- Cannat M., Briais A., Deplus C. et al. Mid-Atlantic Ridge–Azores hotspot interactions: along-axis migration of a hotspot-derived event of enhanced magmatism 10 to 4 Ma ago // Earth Planetary Science Letters. 1999. V. 173. № 3. P. 257–269.
- Charlou J.L., Fouquet Y., Bougault H. et al. Intense CH₄ plumes generated by serpentinization of ultramafic rocks at the intersection of the 15°20' N fracture zone and the Mid-Atlantic Ridge // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1998. V. 62. № 13. P. 2323–2333.
- Dmitriev L.V., Sokolov S.Yu., Sokolov N.S. Migration of the Azores superplume: geophysical and petrologic evidence // Russian Journal of Earth Sciences. V. 3. № 6. December 2001a. P. 395–404.
- Dmitriev L.V., Koronovsky N.V., Sokolov S.Yu. et al. Tectonic-magmatic history of the North Atlantic lithosphere formation by the isochrone gravity profiling // European Geophysical Society. 26th General Assembly. 2001b. Geophysical Research Abstracts. V. 3. P. 818.
- GEBCO 30" Bathymetry Grid. Version 20141103. 2014. (<http://www.gebco.net>).
- Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic Tomography: A snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. V. 7. № 4. P. 1–7.
- GPS Time Series Data. Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology. 2008. (<http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>).
- Harvard CMT. Harvard University Centroid-Moment Tensor Catalog. 2007. (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).
- Maus S., Barckhausen U., Berkenbosch H. et al. EMAG2: A 2-arc-minute resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne and marine magnetic measurements // Geochemistry Geophysics Geosystems. V. 10. № 8. P. 1–12. doi:10.1029/2009GC002471.
- Mazarovich A.O., Sokolov S.Yu. Hydrothermal fields in the Mid-Atlantic ridge: Setting and prospects for further discoveries // Russian Journal of Earth Sciences. V. 4. № 6. December 2002. P. 423–431.
- Muller R.D., Sdrolias M., Gaina C. et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2008. V. 9. № 4. P. 1–19. doi:10.1029/2007GC001743.
- Sandwell D.T., Smith W.H.F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS-1 Satellite Altimetry // JGR. 1997. V. 102. № B5. P. 10039–10054. (<ftp://topex.ucsd.edu/pub/>).
- Sokolov S.Yu., Sokolov N.S., Dmitriev L.V. Geodynamic zonation of the Atlantic Ocean lithosphere: Application of cluster analysis procedure and zoning inferred from geophysical data // Russian Journal of Earth Sciences. 2008. V. 10. № 4. ES4001, doi:10.2205/2007ES000218. P. 1–30.
- Van der Hilst R.D., Widiyantoro S., Engdahl E.R. Evidence of deep mantle circulation from global tomography // Nature. 1997. V. 386. № 6625. P. 578–584.
- Zhang Y.S., Tanimoto T. Ridges, hotspots and their interaction, as observed in seismic velocity maps // Nature. 1992. V. 355. № 6355. P. 45–49.

**TECTONIC PECULIARITIES OF THE MID-ATLANTIC RIDGE
BASED ON DATA ON CORRELATION BETWEEN SURFACE PARAMETERS
AND GEODYNAMIC STATE OF THE UPPER MANTLE**

S.Y. Sokolov

Geological Institute RAS, Moscow, 119017

The author compared various geologic-geophysical data along the Mid-Atlantic Ridge axis (MAR) from 55° south latitude to 80° north latitude and geodynamic setting of the upper mantle, which was determined using V_p/V_s speed ratio of seismic-tomographic models. The study revealed geodynamic impact of “cold” blocks in the upper mantle at a depth of about 500 km with long fault zones. Besides, gravity signatures, seismicity, types of magmatism, half rate spreading, FeO content in basalts, and cluster combinations of geological and geophysical parameters along the MAR axis form sets of facts, which have consistent geodynamical interpretation of impact of “cold” and “hot” blocks in the mantle on the lithospheric characteristics changed on the surface. GPS data showed that rheological state factor of the mantle is supplied by submeridional movement componenta, which forms combined parameters common for forearc zones, untypical distribution mechanisms of earthquake sources and activation of deformation and strain along sublatitudinal zones with transpression regime. The observed asymmetry of half plane spreading is almost equal to zero on the MAR segments above the “cold” blocks of the mantle. Nonuniform velocity profile along magnetic isochrone lines on the both sides of the MAR provides conditions for sharing deformations in intraplate environment including passive zones of transform faults and discordant fault troughs.

Keywords: cold mantle blocks, asymmetry of half rate spreading, transpression, ridge.